

Analysis of Prestressed Concrete Bridges Constructed by the Cantilever Method in Service Stage

Dr. Hajem AL- Wadi *

Dr. Rafat Edlebi **

Husam Haddad ***

(Received 12 / 9 / 2019. Accepted 28 / 6 / 2020)

□ ABSTRACT □

The research presents a proposed algorithm for calculating time-dependent deformations in bridges constructed by cantilever method. In this algorithm, creep deformations are analyzed using "Age-Adjusted Effective Modulus" and Principle of Superposition, Also the forces resulting from these deformations are calculated. The proposed algorithm was used to create a computer program to calculate these deformations. This program was used to analyze the Kędzierzyn-Koźle bridge in Poland. The results showed the importance of the additional forces resulting from the time-dependent deformations and the need to take them into account in the design.

Keywords: cantilever method, Time- Dependent deformations, creep of concrete, Age-Adjusted Effective Modulus.

* Professor- Faculty of Civil Engineering - Transportation Department- Damascus University- Damascus- Syria. halwadi59@hotmail.com

**Associate Professor- Faculty of Civil Engineering- Transportation Department- Damascus University- Damascus- Syria. dr_edlebi123@yahoo.com

***Postgraduate student (PhD)- Faculty of Civil Engineering- Transportation Department-Damascus University- Damascus- Syria. husam0haddad@gmail.com

تحليل الجسور الخرسانية المسبقة الإجهاد المنشأة بالطريقة الظرفية في مرحلة الاستثمار

د. محمد هاجم الوادي*

د. رأفت الأدلبي**

حسام حداد***

(تاريخ الإيداع 12 / 9 / 2019. قُبل للنشر في 28 / 6 / 2020)

□ ملخص □

يعرض هذا البحث خوارزمية حسابية مقترحة لتحليل التشوهات التابعة للزمن في الجسور المبنية بالطريقة الظرفية وذلك باستخدام المعامل الفعال المعدل ومبدأ التراكب في تحليل تشوهات زحف البيتون، ومن ثم حساب القوى الإضافية التي تسببها هذه التشوهات. وتم الاعتماد على الخوارزمية المقترحة لإنشاء برنامج كمبيوتر يقوم بحساب هذه التشوهات والذي تم استخدامه لتحليل جسر "Kędzierzyn-Koźle" المنشأ في بولندا، وقد أظهرت النتائج أهمية القوى الناتجة عن التشوهات التابعة للزمن وضرورة أخذها بعين الاعتبار عند التصميم.

الكلمات المفتاحية: الطريقة الظرفية، التشوهات التابعة للزمن، زحف البيتون، المعامل الفعال المعدل.

* أستاذ ، قسم النقل ومواد البناء، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق، دمشق، سورية.

** أستاذ مساعد ، قسم النقل ومواد البناء، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق، دمشق، سورية.

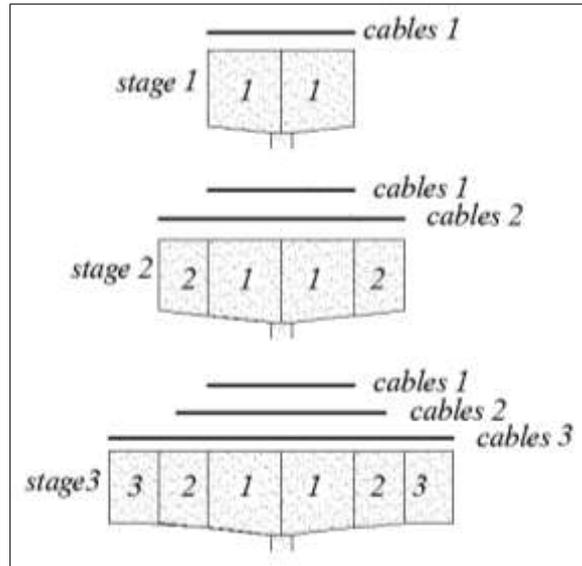
*** طالب دكتوراه ، قسم النقل ومواد البناء، كلية الهندسة المدنية، جامعة دمشق، دمشق، سورية.

مقدمة:

تتألف كل فتحة في الجسور المنشأة بالطريقة الظرفية من ظفرين متناظرين في الغالب يتصلان بعد تمام الإنشاء. وكل ظفر يتم إنشاؤه بالتزامن مع الظفر المشترك معه بنفس الركييزة من الفتحة المجاورة الشكل (1) وهو ما يسمى بطريقة إنشاء الظفر المتوازن [1] ، ويتم إنشاء كل ظفر على مراحل متتابعة باستمرار حيث يتم في كل مرحلة صب قطعة وشد كابلاتها قطعة تلو الأخرى باستخدام قالب منزلق يستند على القطعة المصبوبة بعد تصلبها حتى اكتمال بناء الظفر وبذلك نستغني عن السقالات المؤقتة.



الشكل (1) طريقة الإنشاء الظرفية [1]



الشكل (2) إنشاء القطع وشد الكابلات على مراحل

مشكلة البحث:

أظهر عدد كبير من الجسور المنشأة بالطريقة الظرفية في بلدان مختلفة من العالم تشوهات متزايدة مع الزمن خلال استثمار المنشأ، وأثرت هذه التشوهات على وظيفة المنشأ الاستثمارية إضافة إلى الناحية الجمالية، ويعود السبب في ذلك بالدرجة الأولى إلى ظاهرة زحف البيتون [2].



الشكل (3) السهم في جسر Koror-Babeldaob (241m) بعد 18 سنة من الإنشاء [3]

إن تطور التشوهات مع الزمن يمكن أن يؤثر على السلامة الإنشائية للمنشأ عند وجود عيوب إنشائية أخرى في التصميم كما حصل في جسر Koror-Babeldaob الذي انهار في جمهورية بالاو الشكل (3) [3]، فعند الإنشاء غير المتزامن بين الأظفار المتقابلة فإنه وبسبب اختلاف عمر البيتون وشد الكابلات بين الظفرين فإن التشوهات المتطورة فيهما خلال عمر المنشأ ستكون غير متساوية نتيجة ظاهرة زحف البيتون وارتخاء الكابلات الأمر الذي سينشأ عنه قوى إضافية على المنشأ بسبب وصل هذين الظفرين عند تمام لإنشاء.

وإن التحليل الدقيق للتشوهات التابعة للزمن في كل ظفر يتطلب الأخذ بعين الاعتبار ما يلي كون الإنشاء يتم على مراحل متتالية:

- عمر البيتون مختلف بين قطعة وأخرى وتأثير ذلك على قيم تشوهات الزحف.
 - بسبب طريقة الإنشاء فإن الحمولات على كل قطعة يتم تطبيقها بشكل متتالي وليس في نفس اللحظة الأمر الذي يؤثر على قيم معاملات الزحف
 - يتم شد الكابلات بعد تصلب القطعة بحيث يصل الكبل من القطعة التي تصلبت حتى القطعة المقابلة في الظفر المجاور مروراً بكل القطع السابقة الشكل (2) لذلك فإن لكل كبل في قطعة محددة زمن شد مختلف وبالتالي قيم مختلفة للارتخاء.
- كل ذلك يجعل من تحليل المنشأ بشكل دقيق أكثر تعقيداً ويجعل من الحسابات المطلوبة طويلة أكثر.

أهمية البحث وأهدافه:

الهدف من البحث هو انشاء خوارزمية للحساب الدقيق للتشوهات الناتجة عن الزحف في الجسور الخرسانية المسبقة الإجهاد المبنية بالطريقة الظرفية وتطورها مع الزمن وحساب القوى الإضافية الناتجة بسبب وصل الأظفار بشكل مبسط ما أمكن ذلك. مع الإشارة إلى أن هناك العديد من العوامل الأخرى التي تؤثر على تشوهات هذا المنشأ مثل انكماش البيتون ولكن يبقى التأثير الأهم هو لظاهرة زحف البيتون [2] لذلك فإن هذا البحث سيركز على دراسة تأثير الزحف.

منهجية تحليل التشوهات التابعة للزمن:

مبدأ التراكب (superposition):

اعتمدنا في تحليل تشوهات الزحف في هذه الخوارزمية على فرضية التراكب والتي تعتبر أن تشوه الزحف الكلي الناتج عن حمولات مطبقة خلال أعمار مختلفة للبيتون يساوي مجموع التشوهات الناتجة عن هذه الحمولات فيما لو طبقت كل منها منفردة حيث أن القبول بهذا المبدأ يعطي قيمةً جداً قريبة من الواقع وفق ما خلصت إليه العديد من الدراسات التي تناولت هذا الموضوع [4].

مفهوم المعامل الفعال المعدل (Age-Adjusted Effective Modulus):

عند حساب التشوهات الناتجة عن قوى تتطور تدريجياً مع الزمن فإن استخدام معامل الزحف سيعطينا نتائج مبالغ فيها لأن معامل الزحف يصلح لأجل حساب التشوهات الناتجة عن قوى مطبقة آنياً، لذلك فإن حساب التشوهات الناتجة عن قوى تتطور تدريجياً مع الزمن سيتم باستخدام مفهوم المعامل الفعال المعدل (Age-Adjusted Effective Modulus) الذي طرحه Bazzant بعد تعديل طريقة حساب معامل التقادم (aging coefficient) وفيما يلي العلاقات اللازمة لحساب قيمة هذا المعامل في اللحظة t لأجل حمولة مطبقة في اللحظة t_0 [5]:

$$E''(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{(1 + \chi(t, t_0) \cdot \phi(t, t_0))} \quad (1)$$

$$\chi(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{E_c(t_0) - R(t, t_0)} - \frac{1}{\phi(t, t_0)} \quad (2)$$

$$R(t_0, t) = \frac{0.992}{J(t_0, t)} - \frac{0.115}{J(t-1, t)} * \left(\frac{J(t_0, t_0 + 0.5 * (t - t_0))}{J(t - 0.5 * (t - t_0), t)} - 1 \right) \quad (3)$$

$$J(t_0, t) = \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E_c(t_0)} \quad (4)$$

و يمكن حساب قيمة هذا المعامل بطريقة أسهل لكن تبقى الطريقة المعروضة أكثر دقة [6]

وباستخدام هذا المعامل فإن التشوه المتغير مع الزمن $\varepsilon(t)$ يحسب كما يلي:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t) - \sigma(t_0)}{E''(t, t_0)} \quad (5)$$

حيث:

$E''(t, t_0)$: المعامل الفعال المعدل في اللحظة t لأجل حمولة مطبقة في اللحظة t_0 .

$E_c(t_0)$: معامل مرونة البيتون لحظة تطبيق الحمولة t_0 .

$\chi(t, t_0)$: معامل التقادم في اللحظة t لأجل حمولة مطبقة في اللحظة t_0 .

$R(t, t_0)$: ارتخاء البيتون (relaxation of concrete) .

$\emptyset(t, t_0)$: معامل زحف البيتون.

$\sigma(t) - \sigma(t_0)$: قيمة الإجهاد المطبق في اللحظتين t, t_0 .

إن القوى المتطورة تدريجياً مع الزمن التي سنحسبها في هذا البحث هي ارتخاء الكابلات (relaxation of tendon) والقوى الناشئة عن الوصل.

حساب التشوهات:

سيتم حساب التشوهات لأجل كل ظفر في كل قطعة على حدا، ولأجل كل قطعة مدروسة فإنه يتم دراسة الحملات الناتجة عن كل قطعة تالية على حدا وذلك ليتم أخذ تأثير عمر البيتون بالحسبان. وللحصول على قيم والتشوهات الكلية الحاصلة في قطعة محددة لأجل أي لحظة فإنه يتم جمع قيم والتشوهات الناتجة عن حملات القطع التالية المنشأة حتى اللحظة المعتبرة وذلك وفق مبدأ superposition الأمر الذي يمكن التعبير عنه بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon_{i,j} = \sum_{ii=i}^j \varepsilon_{i,ii,j} \quad (6)$$

حيث:

$\varepsilon_{i,j}$: التشوه الكلي الحاصل في القطعة i في اللحظة j نتيجة كل الحملات المطبقة حتى اللحظة j .

i : رقم القطعة المدروسة $(1 \leq i \leq m)$ ، m : عدد قطع الظفر.

ii : رقم المرحلة $(i \leq ii < n)$ ، n : عدد المراحل المعتبرة.

j : رقم اللحظة الزمنية المعتبرة وسنعتبر لحظتين زمنيتين تحسب لأجلهما قيمة التشوهات وهما لحظة وصل الظفر ولحظة نهاية العمر التصميمي.

حيث نعتبر مرحلة لأجل كل قطعة إضافة إلى مرحلة تمثل الوصل ومرحلة تمثل نهاية العمر التصميمي للمنشأ فيكون $n = m + 2$.

$\varepsilon_{i,ii,j}$: التشوه الحاصل في القطعة i في اللحظة j نتيجة الحملات المطبقة في المرحلة ii .

وسنعمد في حساب السهوم والتشوهات الزاوية على المعادلة التفاضلية للخط المرن:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = M_x \quad (7)$$

حيث: E هو معامل المرونة و I عزم العطالة و M_x العزم المتغير على طول العنصر المدروس

ولاستخدام هذه المعادلة فإننا نميز أربع حالات الشكل (4) حيث نحصل على قيم التشوهات الزاوية بكاملة المعادلة السابقة ونحصل على الانتقالات الشاقولية بالمكاملة مرة ثانية:

1- العزم ينتج من الوزن الذاتي للقطعة:

$$\alpha = w \frac{L^2}{6EI} \quad (8)$$

$$y = w \frac{L^3}{8EI} \quad (9)$$

2- العزم ينتج عن وزن قطعة تالية:

$$\alpha = \frac{w \left(\frac{L^2}{2} + \frac{L' \cdot L}{2} + L \cdot \Delta L \right)}{E \cdot I} \quad (10)$$

$$y = \frac{w \left(\frac{2L^3}{6} + \frac{L' \cdot L^2}{4} + \frac{L^2}{2} \cdot \Delta L \right)}{E \cdot I} \quad (11)$$

3- العزم ثابت على كامل القطعة وهي الحالة التي نستخدمها مع عزوم سبق الاجهاد وارثاء الكابلات والعزم الإضافي الناشئ في نهاية الظفر بعد الوصل:

$$\alpha = \frac{M \cdot L}{E \cdot I} \quad (12)$$

$$y = \frac{M \cdot L^2}{2E \cdot I} \quad (13)$$

4- العزم ينتج عن قوة مركزة في نهاية الظفر ونستخدمها لأجل القوة الإضافية الناشئة في نهاية الظفر بعد الوصل:

$$\alpha = N \cdot \frac{L^2 + L \cdot l}{E \cdot I} \quad (14)$$

$$y = N \cdot \frac{L^3 + 3 \cdot L^2 \cdot l}{6E \cdot I} \quad (15)$$

حيث:

α : التشوه الزاوي.

y : الانتقال الشاقولي.

وبعد حساب التشوهات في كل قطعة فإن السهم الكلي في نهاية كل قطعة يتم حسابه على اعتبار أنه يساوي مجموع القيم التالية الشكل (5):

- السهم في نهاية القطعة السابقة (h_1).

- الانتقال الشاقولي الناتج عن الدوران في نهاية القطعة السابقة (h_2).

- الانتقال الشاقولي نتيجة تشوه القطعة نفسها (h_3).

ويكون الدوران الكلي الحاصل في كل قطعة يساوي الدوران في نهاية القطعة السابقة مضاف إليه التشوه الزاوي في القطعة المدروسة وعليه نستطيع أن نكتب لأجل كل لحظة زمنية:

$$\theta_{i,j} = \theta_{i-1,j} + \alpha_{i,j} \quad (16)$$

$$f_{i,j} = f_{i-1,j} + \theta_{i-1,j} * L_i + y_{i,j} \quad (17)$$

$\theta_{i,j}$: الدوران الكلي الحاصل في نهاية القطعة i في اللحظة j .

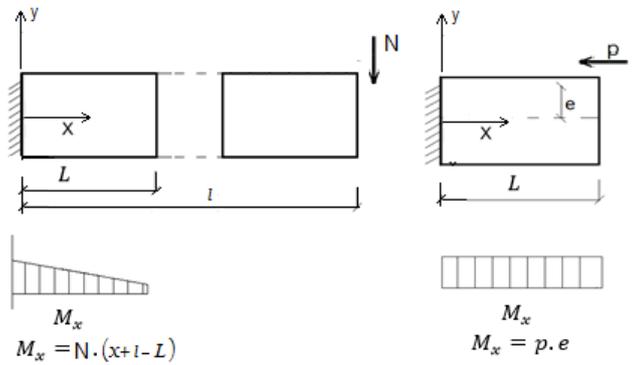
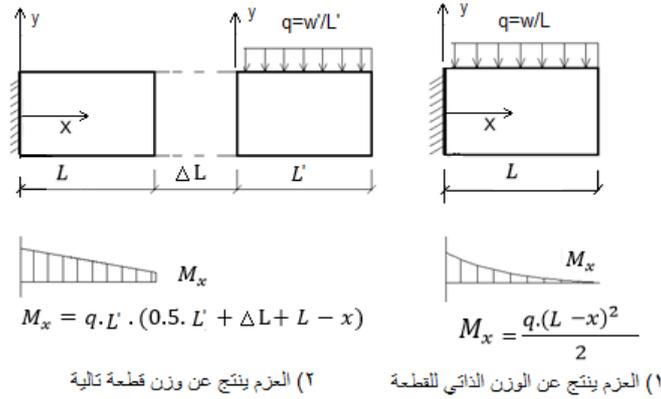
$f_{i,j}$: السهم في نهاية القطعة i في اللحظة j .

L_i : طول القطعة i .

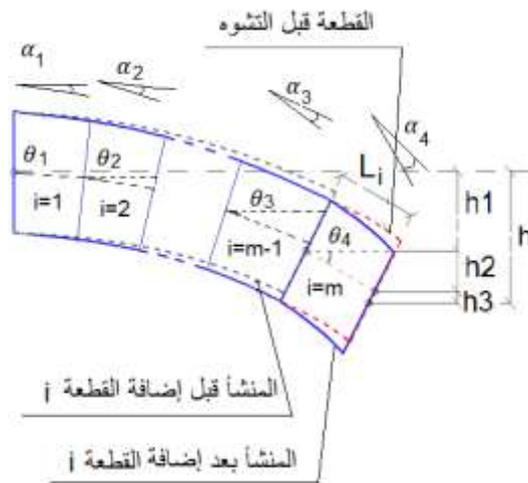
ولأجل $i=m$ أي القطعة الأخيرة نحصل على الدوران والسهم في نهاية الظفر رقم (h) لأجل أي لحظة زمنية:

$$f_{h,j} = f_{m,j} \quad (18)$$

$$\theta_{h,j} = \theta_{m,j} \quad (19)$$



الشكل (4) العزوم الحاصلة خلال مراحل الإنشاء



الشكل (5) السهم المتشكل في الظفر [7]

تحسب التشوهات الأنبية الناتجة عن الأوزان الذاتية وقوى سبق الإجهاد وفق العلاقات (8,9,10,11,12,13) ، وتحسب والتشوهات الناتجة عن عزم ارتخاء الكابلات (M_r) وفق العلاقاتين (12,13) باستخدام المعامل الفعال، ونحصل على التشوهات الكلية في كل قطعة ولأجل كل لحظة زمنية باستخدام العلاقة (6) كما يلي:

$$\alpha_{i,j} = \sum_{ii=i}^j \frac{Mr_{i,ii,j} \cdot L_i}{E''_{i,ii,j} \cdot I_i} + \alpha_{0,i,ii} * (1 + \phi_{i,ii,j}) \quad (20)$$

$$Y_{i,j} = \sum_{ii=i}^j \frac{Mr_{i,ii,j} \cdot L_i^2}{2 \cdot E''_{i,ii,j} \cdot I_i} + Y_{0,i,ii} * (1 + \phi_{i,ii,j}) \quad (21)$$

من المرحلة $ii=i$ حتى اللحظة j .
 $\alpha_{i,j}$, $Y_{i,j}$: التشوه الزاوي والانتقال الشاقولي الكلي الحاصل في نهاية القطعة i في اللحظة j نتيجة الحمولات المطبقة

$Mr_{i,ii,j}$: العزم الحاصل على القطعة i في اللحظة j نتيجة الكابلات المشدودة في المرحلة ii .

$E''_{i,ii,j}$: المعامل الفعال للقطعة i في اللحظة j لأجل حمولات مطبقة في المرحلة ii .

L_i : طول القطعة i ، I_i : عزم عطالة القطعة i .

$\alpha_{0,i,ii}$, $Y_{0,i,ii}$: التشوه الزاوي والانتقال الشاقولي الآني الحاصل في نهاية القطعة i نتيجة الحمولات لخارجية (أوزان ذاتية وقوى سبق إجهاد) المطبقة في المرحلة ii .

$\phi_{i,ii,j}$: معامل زحف البيتون للقطعة i في اللحظة j نتيجة الحمولات المطبقة في المرحلة ii .

وكما هو واضح في العلاقاتين السابقتين فإن تأثير الزحف تم حسابه بضرب التشوه الآني بقيمة معامل الزحف الموافقة اما بالنسبة للتشوهات الناتجة عن ارتخاء الكابلات فإن تشوهات الزحف أخذت بعين الاعتبار باستخدام المعامل الفعال المعدل.

حساب القوى الناتجة عن وصل الأظفار:

بسبب اختلاف زمن انشاء الأظفار المتقابلة فإن تطور التشوهات مع الزمن في كل ظفر والناتج عن الزحف وارتخاء الكابلات لن يكون متساويا لحظة الوصل لذلك يتم إنشاء سهم عكسي لأجل كل قطعة منشأة ليلتقي الظفران الموصولان عند نفس المنسوب لحظة الوصل.

وتتطور التشوهات في الظفرين الموصولين من لحظة الوصل وحتى نهاية العمر التصميمي بقيم غير متساوية الأمر الذي ينتج عنه قوى متطورة مع الزمن (N,M) تجعل من هذه القيم متساوية شكل (6)، وعليه نستطيع أن نكتب:

$$\Delta f_h = \Delta f_{h+1} \quad (22)$$

$$\Delta \theta_h = -\Delta \theta_{h+1} \quad (23)$$

$\Delta f_h, \Delta f_{h+1}$: التغير في السهم من لحظة الوصل وحتى نهاية العمر التصميمي لأجل الظفرين الموصولين $h, h+1$.

$\Delta \theta_h, \Delta \theta_{h+1}$: التغير في الدوران من لحظة الوصل وحتى نهاية العمر التصميمي لأجل الظفرين الموصولين $h, h+1$.

ولحساب القوى (N,M) سنستخدم الأسلوب الذي استخدمه Bazant and Panula [8] أي بالتعويض في المعادلتين السابقتين لذلك سنقوم بداية بحساب التشوهات الناتجة عن قوى مطبقة لحظة الوصل و تتطور تدريجيا حتى تصل الى القيمة واحد في نهاية العمر التصميمي $(N=1, M=1)$ حيث تحسب هذه التشوهات وفق العلاقات (15,14,13,12) باستخدام المعامل الفعال المعدل كما يلي :

$$\alpha N_{i,j} = \frac{L^2 + L \cdot l}{E''_{i,ii,j} \cdot I_i} \quad (24)$$

$$y N_{i,j} = \frac{L^3 + 3 \cdot L^2 \cdot l}{6 \cdot E''_{i,ii,j} \cdot I_i} \quad (25)$$

$$\alpha M_{i,j} = \frac{L}{E''_{i,ii,j} \cdot I_i} \quad (26)$$

$$y M_{i,j} = \frac{L^2}{2 \cdot E''_{i,ii,j} \cdot I_i} \quad (27)$$

حيث:

$i\bar{i}$: تمثل مرحلة الوصل وتكون قيمتها $m+1$.

j : تمثل لحظة نهاية العمر التصميمي وتكون قيمتها n .

$YN_{i,j}, \alpha N_{i,j}$: التشوه الزاوي والانتقال الشاقولي في القطعة i في اللحظة j بتأثير $(N=1)$.

$YM_{i,j}, \alpha M_{i,j}$: التشوه الزاوي والانتقال الشاقولي في القطعة i في اللحظة j بتأثير $(M=1)$.

ويستخدم العلاقات (16,17,18,19) يتم حساب السهم والدوران عند نهاية الظفر والنتيجة عن $(N=1, M=1)$ وذلك

لأجل قيمة j الموافقة لنهاية العمر التصميمي: $fN_h, fM_h, \theta N_h, \theta M_h$.

حيث:

fN_h, fM_h : السهم الناتج عن القوتين $(N=1, M=1)$ على التوالي في نهاية الظفر رقم h .

$\theta N_h, \theta M_h$: الدوران الناتج عن القوتين $(N=1, M=1)$ على التوالي في نهاية الظفر رقم h .

وبالتعويض في العلاقاتين (22,23) يكون:

$$N_s * fN_h + M_s * fM_h + r_h * Le_h + (f_{h,2} - f_{h,1}) = -N_s * fN_{h+1} + M_s * fM_{h+1} - r_{h+1} * Le_{h+1} + (f_{h+1,2} - f_{h+1,1}) \quad (28)$$

$$N_s * \theta N_h + M_s * \theta M_h + r_h + (\theta_{h,2} - \theta_{h,1}) = -[N_s * \theta N_{h+1} + M_s * \theta M_{h+1} - r_{h+1} + (\theta_{h+1,2} - \theta_{h+1,1})] \quad (29)$$

حيث:

s, h : تشير إلى رقم الظفر ورقم الفتحة على التوالي.

M_s, N_s : القوى الإضافية في نهاية العمر التصميمي في الفتحة رقم s .

r_h : الدوران الحاصل في بداية الظفر رقم h في نهاية العمر التصميمي.

Le_h : الطول الكلي للظفر رقم h .

$f_{h,2}, \theta_{h,2}$: التشوه الزاوي والسهم في الظفر رقم h في حال عدم الوصل لأجل $(j=2)$ أي في نهاية العمر التصميمي.

$f_{h,1}, \theta_{h,1}$: التشوه الزاوي والسهم في الظفر رقم h في حال عدم الوصل لأجل $(j=1)$ أي في لحظة الوصل.

ومن شرط التوازن عند المساند فإنه لأجل مسند طرفي:

$$N_s * Le_h + M_s = 0 \quad (30)$$

ولأجل مسند وسطي:

$$N_s * Le_h + M_s = -N_{s+1} * Le_h + M_{s+1} \quad (31)$$

وبذلك نحصل على عدد معادلات يساوي عدد المجاهيل.

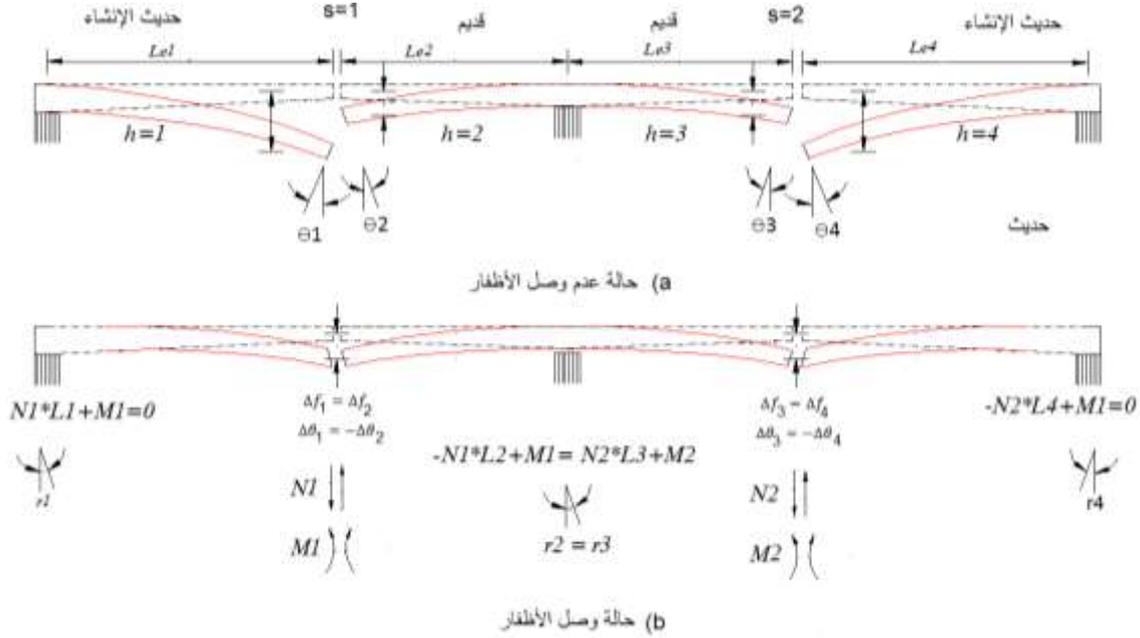
إن المعادلات السابقة تمت كتابتها وفق اصطلاح الاشارات التالية:

السهم والتشوه الزاوي الموافق للعزم الموجب تكون إشارته موجب، القوى إشارتها من إشارة السهم الذي ينتج عنها،

والدوران عند المساند إشارته موجبة إذا كان الدوران عكس عقارب الساعة.

على سبيل المثال لأجل المنشأ الموضح بالشكل (6) هو منشأ بفتحيتين أي أربع أظفار لدينا سبعة مجاهيل:

ونستطيع ان نكتب سبع معادلات: أربع معادلات تنتج عن تساوي السهوم والتشوهات الزاوية في كل فتحة وثلاث معادلات تنتج من توازن المساند. وبالحل المشترك لهذه المعادلات نحصل على القوى الناشئة عند نقاط الوصل. ولأجل حمولات مطبقة بعد الوصل (حمولات التغطية) يمكن اتباع نفس الأسلوب. تفاصيل أكثر حول حساب هذه القوى موضحة في مقالة Bazant [8].



الشكل (6) القوى الناتجة عن وصل الأظفار في نهاية العمر التصميمي

برنامج الكمبيوتر:

تم الاعتماد على الخوارزمية المقترحة لإنشاء برنامج كمبيوتر باستخدام لغة C++ حيث معاملات الزحف في هذا البرنامج تحسب باستخدام نموذج التنبؤ CEB MC90-99 [9] مع الأخذ بعين الاعتبار الجدول الزمني للإنشاء ، والمخطط الموضح في الشكل (9) يبين تسلسل خطوات الحساب في هذا البرنامج.

مثال تطبيقي

تم استخدام البرنامج المنشأ لتحليل التشوهات في جسر "Kędzierzyn-Koźle" [10] المنشأ في بولندا والذي يتألف من خمس فتحات الشكل (7) و الشكل (8) ، الفتحة الأولى والأخيرة منفذة بطريقة incremental launching وباقي الفتحات منفذة بالطريقة الظرفية حيث انشاء كل قطعة تحتاج سبعة أيام لصب البيتون وشد الكابلات وانتقال القالب للبدء بالقطعة التالية حيث يتم شد كابلين في كل مرحلة. وتم الاعتماد على المعطيات التالية لتحليل المنشأ:

$$R_H = 70\% , f'_{c28} = 45 \text{ Mpa} , E_{c,28} = 41000 \text{ Mpa} , N_i = 371 \text{ t}$$

حيث:

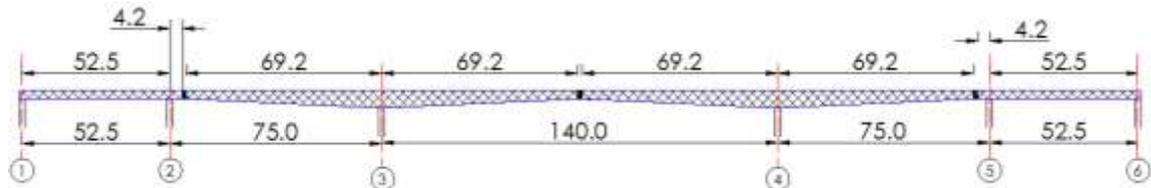
R_H : الرطوبة النسبية للجو المحيط المستخدمة لحساب قيم معامل الزحف.

$f'_{c28} , E_{c,28}$: معامل مرونة البيتون، والمقاومة المميزة للبيتون عند عمر 28 يوم.

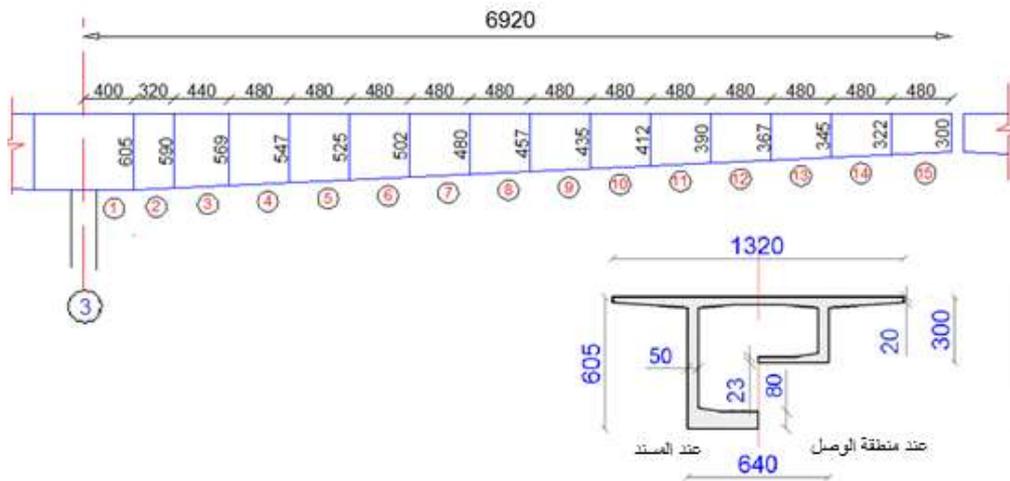
N_i : قوة الشد المطبقة على الكبل بعد حصول الضياعات الأولية.

وقد تم تحليل التشوهات وفق البرنامج الزمني التالي على اعتبار أن كل ظفر يحتاج 120 يوم لتمام الانشاء والعمر التصميمي للمنشأ هو 50 سنة:

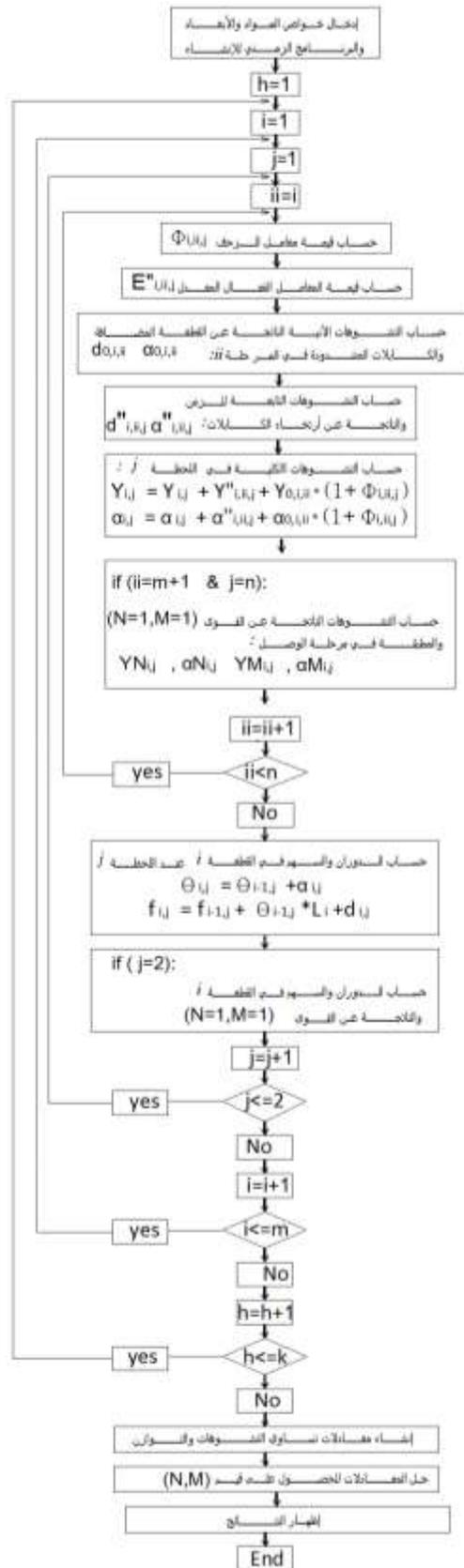
في اليوم الأول يبدأ انشاء الفتحتين الأولى والأخيرة بشكل متزامن لينتهي عند اليوم 80، وفي اليوم (100) يبدأ إنشاء الظفرين المستنديين على الركيزة (3)، وفي اليوم (250) يبدأ إنشاء الظفرين المستنديين إلى الركيزة (4)، ويتم وصل الأظفار المتقابلة في اليوم 380.



الشكل (7) أبعاد جسر Kędzierzyn-Koźle (الأبعاد بالـ m)



الشكل (8) أبعاد الظفر والمقطع العرضي (الأبعاد بالـ cm) [10]



الشكل (9) المخطط التدفقي للخطوات التي يقوم بها البرنامج

النتائج والمناقشة:**النتائج:**

يوضح الشكل (10) قيم العزوم الآتية الناتجة عن الأوزان الذاتية وقوى سبق الإجهاد والتي تنشأ قبل الوصل إضافة إلى مغلف العزوم الناتجة عن الحمولات الحية المطبقة في مرحلة الاستثمار أي بعد الوصل والتي حسبت باعتماد المركبة (HK80) والتي يبلغ وزنها 80t تتألف من أربع محاور عرض كل منها 2.7m وتباع بين المحاور 1.2 m مع حمولة مرافقة (0.4 t/m^2) .

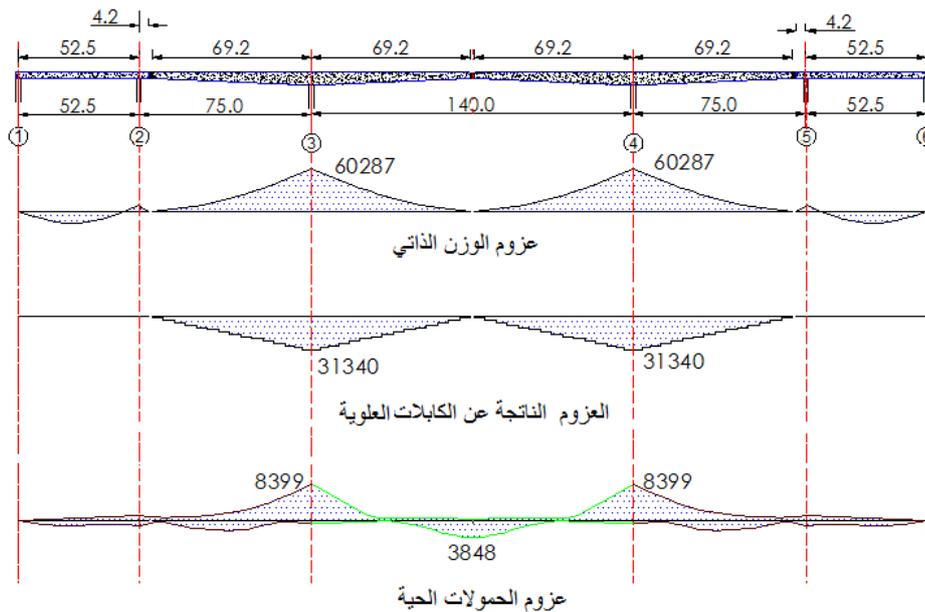
الشكل (11-a) يبين الزيادة في قيم السهوم والتشوهات الزاوية في الأظفار من لحظة الوصل وحتى نهاية العمر التصميمي (50 سنة) وذلك في حال عدم الوصل حيث أن الخط المنقط يمثل المنشأ عند لحظة الوصل على اعتبار أنه يتم إنشاء سهم عكسي في كل قطعة أثناء الإنشاء لضمان التقاء كل ظفرين عند نفس المنسوب.

الشكل (11-b) يبين السهوم الفعلية الناشئة في نهاية العمر التصميمي والتي تتطور من القيمة صفر والقوى الناتجة بسبب الوصل عند نقاط الاتصال.

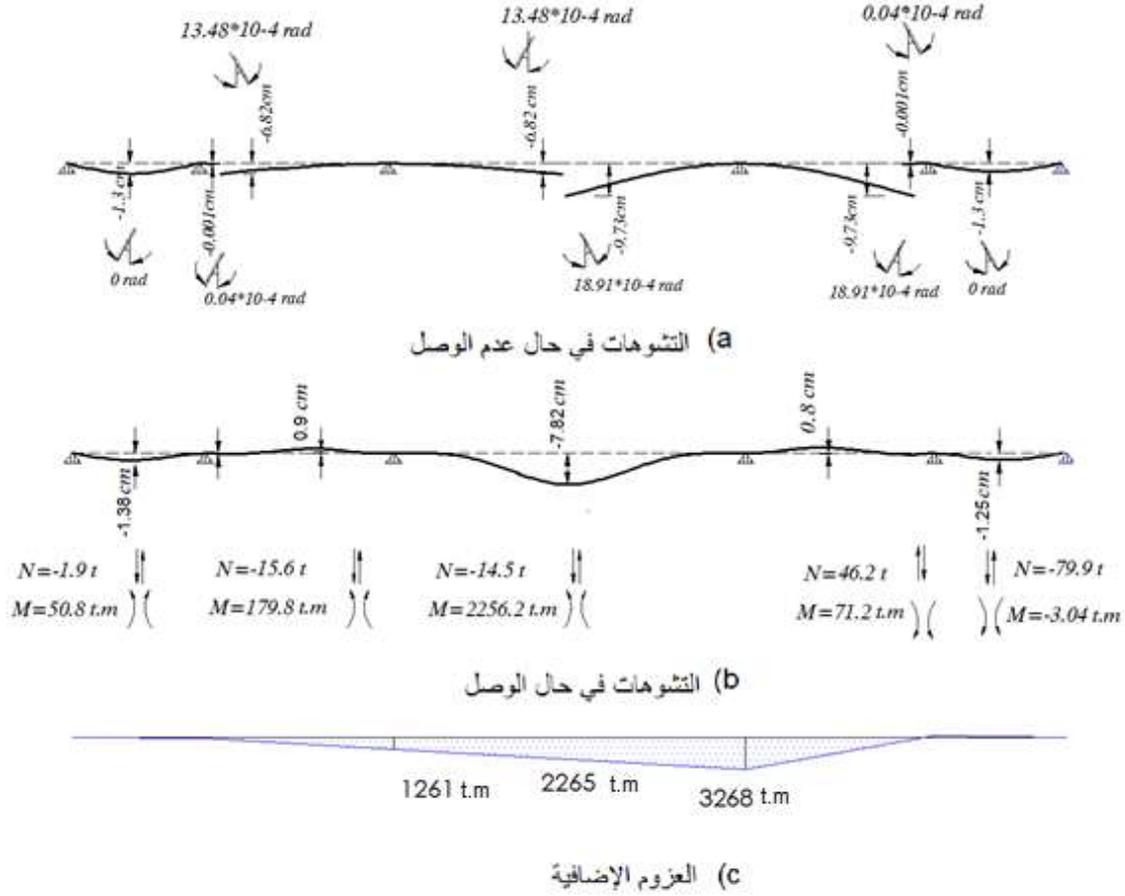
الشكل (11-c) يوضح قيم العزوم الناتجة عن الوصل في نهاية العمر التصميمي

مناقشة النتائج:

تحصل العزوم الموجبة التي تنشأ في الجزء المبني بالطريقة الظرفية نتيجة الحمولات المطبقة خلال مرحلة الاستثمار وهي الحمولات الحية واي حمولات تغطية إضافية ولمقاومة هذه العزوم فإنه يتم شد كابلات سفلية بعد الوصل، وتظهر قيم العزوم الموضحة أن العزوم الإضافية المتطورة مع الزمن تبلغ في نهاية العمر التصميمي 58% من قيمة العزوم الحية لذلك فإن هذه القوى لا يمكن إهمالها ويجب أخذها بعين الاعتبار لتحقيق السلامة الانشائية وعدم ظهور تشوهات تؤثر على وظيفة المنشأ الاستثمارية والتي ظهرت في كثير من الجسور المنشأة بهذه الطريقة. إن القيم التي حصلنا عليها من عزوم وسهوم يمكن أن تكون أكبر من ذلك بكثير في أمثلة أخرى تكون فيها المجازات أكبر وبالتالي اختلاف أكبر بين تشوهات الأظفار الموصولة أو شروط محيطية مختلفة تؤثر على قيم معامل الزحف.



الشكل (10) العزوم الحاصلة على كامل المنشأ (العزوم بال t.m والأبعاد بال m)



الشكل (11) التشوهات والقوى الإضافية في نهاية العمر التصميمي

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- إن ظاهرة زحف البيتون وارتخاء الكابلات واختلاف عمر البيتون بين أجزاء المنشأ ينتج عنه تشوهات وقوى إضافية في الجسور المنشأة بالطريقة الظرفية يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار.
- بسبب طريقة الأثناء الظرفية فإن الحساب القوى الإضافية التي تتطور خلال عمر المنشأ يحتاج لحساب دقيق لقيم التشوهات المتطورة مع الزمن لذلك يجب الأخذ بعين الاعتبار اختلاف عمر البيتون وزمن شد الكابلات بين الأظفار وبين القطع ضمن الظفر الواحد، الأمر الذي يتطلب حسابات طويلة جداً من الصعب إنجازها بدون استخدام الكمبيوتر.

التوصيات:

- النتائج المعروضة في هذا البحث تم الحصول عليها باستخدام نموذج التنبؤ 99-CEB MC90 ومن المهم مقارنتها مع نتائج نماذج تنبؤ أخرى مثل نموذج ACI ونموذج B3 .
- إن دراسة أمثلة أخرى مختلفة من حيث المجازات والشروط المحيطة وخاصة الرطوبة تساهم في بيان تأثير القوى الإضافية المتطورة مع الزمن وتأثيرها على سلامة الجسور المبنية بهذه الطريقة.

References:

- (1) Barras, P. and Matteis, D. *Prestressed Concrete Bridges Built using Cantilever Method*, Ministry of Transport and Infrastructure, France 2008, 291.
- (2) Takács, P. F. *Deformations in Concrete Cantilever Bridges: Observations and Theoretical Modelling*, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway 2002, 205.
- (3) Bazant, Z. P. , Hubler, M., and Yu, Q. *Pervasiveness of Excessive Segmental Bridge Deflections: Wake-Up Call for Creep* , ACI Structural Journal, U.S.A. 2011, pp. 766-774
- (4) Debaiky, S. A. *Analysis of Time-Dependent Effects on Segmental Prestressed Concrete Curved Box-Girder Bridges*, , Concordia University, Montreal, Canada. 1997, 179.
- (5) Bazant, Z. P. *Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method*, ACI journal, U.S.A. Vol. 69, No. 4, 1972, 212-217.
- (6) Lacidogna, G. and Tarantino, M. *Approximate expressions for the ageing coefficient and the relaxation function in the viscoelastic analysis of concrete structures*, Materials and Structures, France, Vol. 29, 1996, 131-140,.
- (7) Herbert J. T. *Computer Analysis of Deflections and Sresses in stage Constructed Concrete Bridges*, PCI journal, U.S.A. 1990, 52-62.
- (8) Bazant, Z. P., and Panula, L. *Creep and Shrinkage Characterization for Analyzing Prestressed Concrete Structure*, PCI journal, U.S.A. 1980, 86-122.
- (9) ACI Committee 209. *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*, American Concrete Institute, U.S.A. 2008.
- (10) Biliszczyk, J. and Machelski, C. *Obiekty Mostowe na Autostradach i Drogach Ekspresowych*, Wroclaw, Poland, 2009, 161-171.